

10MW급 대형 풍력발전기 기어박스를 위한 마그네틱 기어의 설계 및 전달토크 비교분석

김찬호*, 정상용**, 김용재*
조선대*, 성균관대**

Transfer Torque Comparison Analysis and Design of Magnetic Gear for 10MW Wind Turbine Gearbox

Chan-Ho Kim*, Sang-Yong Jung**, Yong-Jae Kim*
Chosun University*, Sungkyunkwan University**

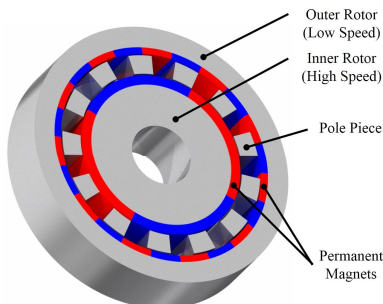
Abstract - 풍력발전기는 2000년대 초반에 발전기 회전자 직경이 80m에 이르는 2MW급 풍력발전기들이 여러 회사에서 개발되면서 경제성 및 신뢰성도 향상되어 비약적인 발전을 이루게 되었다. 풍력발전시장의 신규발주와 설치장소가 한계점에 이르게 됨으로써 경제성이 뛰어난 대형 풍력발전기의 필요성이 대두되고 있다. 이와 같이 풍력발전기의 대형화 추세는 대형화를 통해 에너지 효율의 증대뿐만 아니라 단위 용량 당 건설비 및 설비비 절감이 가능하기 때문에 풍력발전기 대형화를 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만 현재 풍력발전기에 사용되는 기계적 기어박스는 윤활유 주입 및 보수 점검의 문제점이나 소음, 진동, 마찰에 의한 열 발생 등의 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기계적 기어박스를 마그네틱 기어를 이용하여 구성하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 마그네틱 기어를 이용하여 10MW급 풍력발전기의 기어박스를 설계하고 그 가능성을 검토하고자 한다.

1. 서 론

마그네틱 기어는 물리적인 접촉이 없어 기계적인 마찰손실이 없고, 윤활유가 불필요하며, 유지보수가 필요 없다는 장점과 더불어 매우 적은 소음과 진동의 특성을 가지고 있다. 특히, 입력 및 출력축 샤프트가 분리되어 있어 과부하에 대한 보호 능력이 뛰어나며, 이로 인한 신뢰성 향상 및 고효율 구동의 장점을 가지고 있다[1]. 이러한 마그네틱 기어를 이용하여 10MW 풍력발전기의 기어박스를 구성하게 될 경우 종래의 기계적 기어박스보다 기어의 파손 및 윤활유 주입 등에 대한 유지보수 비용 및 유지보수에 필요한 시간을 절감할 수 있어, 대형풍력발전기의 경제성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다[2-3]. 일반적으로 대형풍력발전기의 기어박스는 고속 및 중속 드라이브 트레인으로 나눌 수 있으며, 고속 드라이브 트레인의 기어비는 90:1 ~ 100:1 정도로 베어링의 고속 운전이 있어서 물리적인 한계점이 존재하고 높은 기어비를 구현하기 위하여 그 크기가 매우 커지는 단점이 있다. 한편, 중속 및 저속 드라이브 트레인은 신뢰도가 낮은 고속 기어박스 스테이지를 제거하고 10:1 ~ 60:1 정도의 기어비를 가지도록 하여 다이렉트 드라이브 트레인에 비하여 다극형 영구자석 발전기의 비용을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 10MW 풍력발전기의 기어박스로써의 가능성을 검토하고자 고속, 중속, 저속의 마그네틱기어를 설계하고, 수치 해석 기반 유한요소해석법을 이용한 전달토크 해석결과를 비교분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기용 마그네틱 기어



〈그림 1〉 마그네틱 기어

마그네틱 기어는 그림 1과 같은 구조를 가지고 있으며, Inner Rotor와 Outer Rotor로 구성되어 있다. 또한, 두 Rotor 사이에 Pole Piece가 위치

하고 있어 Inner Rotor 영구자석의 자속과 Outer Rotor 영구자석의 자속을 조절(Modulating)한다. 이러한 마그네틱 기어의 동작은 Inner Rotor와 Outer Rotor의 쌍극수가 p_1, p_2 이며, Inner Rotor와 Outer Rotor의 회전속도가 w_1, w_2 일 때, Pole Piece의 개수 N_s 는 식 (1)과 같고, 마그네틱 기어의 기어비 G_r 은 식 (3)과 같다.

$$N_s = p_1 + p_2 \quad (1)$$

$$w_1 = -G_r w_2 \quad (2)$$

$$G_r = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

2.2 10MW 풍력발전기용 마그네틱 기어의 목표사양 설정

풍력발전기 터빈의 출력은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 풍력터빈의 주속비 λ 는 식 (5), 블레이드의 회전속도 N_{blade} 는 식 (6)과 같다. 여기에서 C_p 는 출력계수, ρ 는 공기의 밀도, A 는 유속에 수직인 유동관의 단면적, v 는 바람의 유속, R_{blade} 는 블레이드의 회전반경, ω_{blade} 는 각속도, v_0 는 입구풍속을 의미한다.

$$P = C_p \times \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{R_{blade} \times \omega_{blade}}{v_0} \quad (5)$$

$$N_{blade} = \frac{60}{2\pi} \times \frac{v_0}{R_{blade}} \times \lambda \quad (6)$$

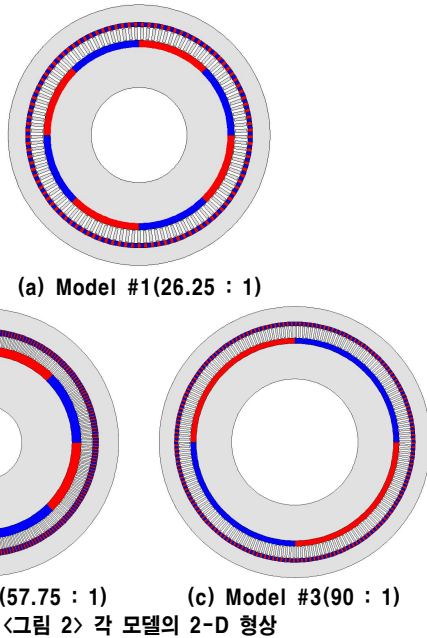
일반적으로 풍력발전기의 블레이드는 10 ~ 20rpm으로 회전하기 때문에 블레이드의 속도가 입력이 되는 마그네틱 기어의 Outer Rotor 회전속도는 20rpm이 되도록 설계 하였으며, 각 모델의 기어비와 목표사양은 표 1과 같이 설정하였다. Model #1은 저속 마그네틱 기어로써 Inner Rotor(발전기 입력축)의 회전속도는 525rpm이며, Model #2는 중속 마그네틱 기어로써 Inner Rotor의 회전속도는 1155rpm이다. 또한, Model #3은 고속 마그네틱 기어로써 Inner Rotor의 회전속도는 1800rpm 이 되도록 목표사양을 설정하였다. 또한, 각 모델의 Outer Rotor에서 요구되는 토크 값은 4774kNm이며, Inner Rotor에서 요구되는 토크 값은 각 모델의 Inner Rotor의 회전속도에 따라 결정된다.

〈표 1〉 각 모델의 목표사양

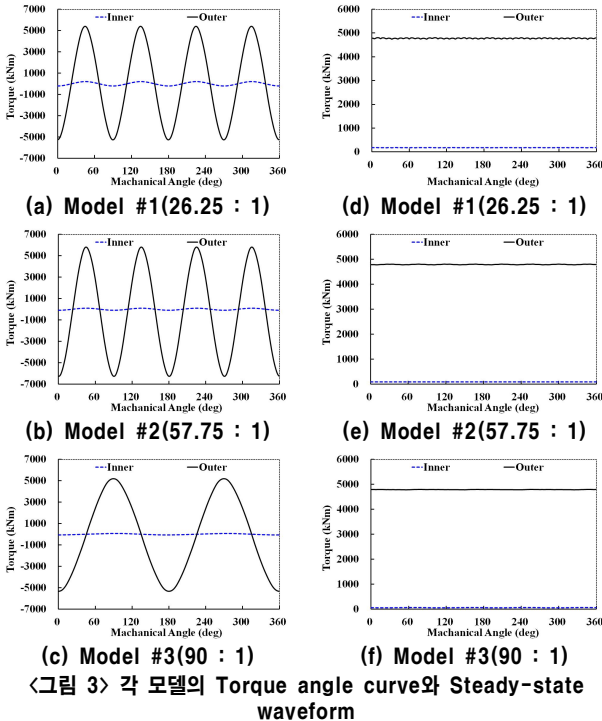
	Model #1	Model #2	Model #3	
Gear ratio	26.25	57.75	90	
pole pairs on inner rotor	8	8	4	
pole pairs on outer rotor	210	462	360	
Number of pole pieces	109	235	182	
Rotation speed	Inner rotor (rpm)	525	1155	1800
	Outer rotor (rpm)	20	20	20
Torque	Inner rotor (kNm)	4774.648	4774.648	4774.648
	Outer rotor (kNm)	181.8914	82.67789	53.05165
Power (MW)	10	10	10	

2.3 해석결과 및 전달토크 비교분석

그림 2에 Model #1, #2, #3의 최종 형상을 나타내었으며, 그림 3에 각 모델의 Torque Angle Curve와 Steady-State Waveform을 나타내었다. 또한, 그 결과를 표 2에 정리하여 나타내었다.



(a) Model #1(26.25 : 1)
(b) Model #2(57.75 : 1) (c) Model #3(90 : 1)
〈그림 2〉 각 모델의 2-D 형상



(a) Model #1(26.25 : 1) (d) Model #1(26.25 : 1)
(b) Model #2(57.75 : 1) (e) Model #2(57.75 : 1)
(c) Model #3(90 : 1) (f) Model #3(90 : 1)
〈그림 3〉 각 모델의 Torque angle curve와 Steady-state waveform

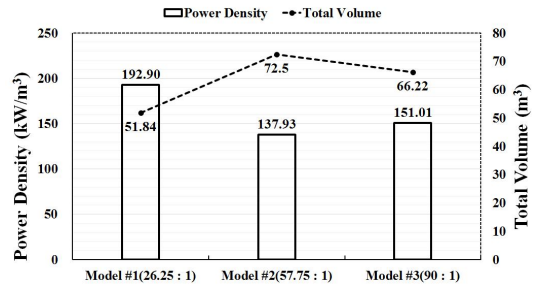
〈표 2〉 각 모델의 기초설계 결과

	Model #1	Model #2	Model #3
Torque ratio	26.34	58.72	90.78
Rotation speed	Inner rotor (rpm)	525	1155
	Outer rotor (rpm)	20	20
Torque	Inner rotor (kNm)	181	81
	Outer rotor (kNm)	4778	4791
Torque ripple	Inner rotor (%)	3.38	2.22
	Outer rotor (%)	1.37	0.60
Power (MW)	10.0	10.0	10.0

각 모델의 Torque Angle Curve는 그림 3(a), (b), (c)에 나타내었으며, Outer Rotor의 최대토크는 Model #1이 5392kNm, Model #2가 5790kNm, Model #3이 5188kNm이다. 이러한 Torque Angle Curve의 최대토크는 Steady-State Waveform의 토크파형에 기인한다. Model #1, #2, #3의 Steady-stage Waveform은 그림 3(d), (e), (f)에 나타내었으며, 각 모델의 Outer Rotor 회전속도는 20rpm으로 동일하며, Model #1의 Inner Rotor 회전속도는 525rpm, Model #2의 경우 1155rpm, Model #3의 경우 1800rpm이다. 또한, Model #1의 Inner Rotor와 Outer Rotor의 토크리플은 3.38%, 1.37%로 나타났으며, Model #2의 경우 2.22%, 0.6%이며, Model #3의 경우 29.44%, 0.33%로 나타났다.

2.4 각 모델의 출력밀도 특성분석

각 모델의 설계결과 모두 Outer Rotor의 토크를 기준으로 10MW의 출력을 나타내고 있으며, 각 모델의 출력밀도 및 총 체적을 나타낸 그래프는 그림 4에 나타내었다. Model #1은 10MW 출력을 위하여 51.84m³의 체적이 사용되었으며, Model #2는 72.5m³, Model #3은 66.22m³의 체적이 사용되어 각 모델의 출력밀도는 Model #1이 192.90kW/m³, Model #2가 137.93kW/m³, Model #3이 151.01kW/m³으로 Model #1이 가장 높았으며, Model #2가 가장 낮은 출력밀도를 보였다.



〈그림 4〉 각 모델의 출력밀도 및 총 체적

3. 결 론

본 논문은 대형 풍력발전기의 대형화 추세에 따른 풍력발전기의 경제성 및 신뢰성 증대를 위하여 종래의 기계적 기어박스를 마그네틱 기어로 대체하는 것을 제시하였으며, 이러한 마그네틱 기어의 적용은 대형 풍력발전기 기어박스의 문제점인 윤활유 주입 및 보수 점검의 문제점이나 기계적인 접촉문제를 해결할 수 있는 장점을 가지고 있어 본 논문에서는 그 적용가능성을 검토하고자 하였다. 따라서, 종래의 기계적 드라이브 트레인에 대해 적용시키기 위하여 고속, 중속, 저속 모델을 설계하고 수치해석기반 유한요소해석법을 이용하여 해석하였으며, 그 설계결과를 비교하였다. 해석결과 Model #1의 경우 192.2kW/m³으로 가장 높은 출력밀도 특성을 나타내었으며, Inner Rotor와 Outer Rotor의 토크리플은 3.38%, 1.37%로 나타나 낮은 토크리플 특성을 보였다. Model #2의 경우 가장 낮은 출력밀도 특성을 보였으나, 토크리플 특성은 Inner Rotor와 Outer Rotor가 2.22%, 0.6%로 낮은 토크리플 특성을 보였다. 하지만 두 번째로 높은 출력밀도 특성을 보인 Model #3은 Outer Rotor의 토크리플이 0.33%로 양호한 특성을 보였으나 Inner Rotor의 토크리플이 29.44%로 높은 리플특성을 보였다. 따라서, 본 논문에서는 10MW 대형 풍력발전기용 고속, 중속, 저속 마그네틱 기어를 설계하고 유한요소해석법을 통하여 비교분석 하였으며, 그 결과 저속의 마그네틱 기어를 선정하였다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임.
(과제번호 : R14XA02-8)

[참 고 문 헌]

- [1] K. Atallah, S.D.Calverley, and D.Howe, "High-performance magnetic gear", J. Magn. Mater., vol. 272-276, sup. 1, pp. E1727-1729, May 2004.
- [2] A. Abdel-Khalik, S. Ahmed, A. Massoud, and A. Elserougi, "Magnetic gearbox with an electric power output port and fixed speed ratio for wind energy applications," in Proc. 20th Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM), pp. 702-708, Sep. 2012.
- [3] Bao, G. Q., and K. F. Mao. "A wind energy conversion system with field modulated magnetic gear." Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, 2011.